·总体工程·

DOI: 10.16592/ j. cnki. 1004 –7859. 2016. 02. 001

毫米波 FMCW SAR 系统设计与成像研究

蔡永俊[1,2],张祥坤[1],姜景山[1]
(1. 中国科学院微波遥感技术重点实验室 国家空间科学中心, 北京 100190)
(2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 首先,详细分析了调频连续波合成孔径雷达(FMCW SAR)机载试验系统,深入阐述了系统各部分的设计方法和主要原理,基于此系统进行首次校飞试验以验证系统性能;其次,深入分析了 FMCW SAR 回波信号特点和图像重建方法,揭示了其脉冲发射期间雷达的连续运动对回波信号的影响,定量地指出了其对图像重建的影响,并采用改进的距离多普勒算法对其补偿从而对场景进行聚焦;最后,通过实际航空校飞试验数据验证了系统分析设计和图像重建算法的有效性。

关键词: 线性调频连续波; 合成孔径雷达; 系统设计; 成像研究

中图分类号: TN958 文献标志码: A 文章编号: 1004 –7859(2016)02 –0001 –05

A Study on System Design and Imaging of Millimeter Wave FMCW SAR

CAI Yongjun[1,2],ZHANG Xiangkun[1],JIANG Jingshan[1]
(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, National Space Science Center, Beijing 100190, China)
(2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Firstly, an airborne FMCW SAR test system is designed and analyzed, and the design methods and main principles of all parts of the system are explained in-depth. Based on the system, a flight test to validate the performance was conducted. Then, the characteristics of echo signal and imaging method of FMCW SAR are analyzed, and the influence on echo signal owing to the constant movement during the pulse sweep time was revealed, and the influence on imaging was quantitatively pointed out, and the revised range Doppler imaging algorithm is used to compensated this effect. At last, the performance and validity of the system and the image reconstruction algorithm designed in this paper are verified by the real flight experiment data.

Key words: frequency modulated continuous wave; synthetic aperture radar; system design; imaging research

0 引 言

传统脉冲体制合成孔径雷达(SAR)由于设备复杂、成本昂贵、体积大、质量大和抗干扰能力不足等缺点使得其无法装载于轻小型飞机、无人机或精确制导武器等平台上完成一些紧急任务,也不适用于低成本要求的民用项目,这大大限制了 SAR 技术的大规模应用。然而,随着近年来无人机技术的快速发展及在军民领域不断深入的应用,其对 SAR 的小型化提出了越来越迫切的需求。

调频连续波合成孔径雷达(FMCW SAR)将合成孔径技术与调频连续波雷达相结合,这种新体制的合成孔径雷达不仅具有调频连续波雷达体积小、质量轻、造价低和抗干扰能力强等特点,同时又具有传统 SAR 的高分辨率的特点,非常适合精确制导武器或无人机等小型平台,成为SAR小型化发展的重要方向,在环境监测、目标识别、军事侦察、农作物评估、地形测绘等众多领域具有广泛的应用前景[1-4]。

由于 FMCW SAR 发射大时宽大带宽线性调频信号,信号持续时长一般为 1 ms ~ 10 ms,而在脉冲 SAR 中该时长一般在微秒量级,所以 FMCW SAR 在系统结构和信号处理方法等方面与脉冲 SAR 具有本质区别。比如,由于大时宽带宽信号导致接收的数据量非常大,就不能采用传统脉冲 SAR 的接收方法,从而也会引起数据处理方法的不同;由于信号时宽较长,必须考虑在脉冲发射期间雷达的连续运动引起的目标与雷达瞬时斜距的改变,而在脉冲体制 SAR 中,该斜距的变化可以忽略,所以对于 FMCW SAR,必须分析雷达的脉内运动对接收信号及图像创建算法的影响,即必须判别“停走停”假设是否成立。

本文首先给出了机载 FMCW SAR 系统分析设计思路和主要组成单元的设计方法,并分析其工作原理;

通信作者: 蔡永俊 Email: caiyongjun89@ gmail. com
收稿日期: 2015-10-23 修订日期: 2015-12-30

然后,分析 FMCW SAR 回波接收方式及其对系统构成和图像重构的影响;其次,对 FMCW SAR 信号特征和图像重建方法进行研究,重点剖析由于脉内雷达的连续运动对接收信号的影响及其解决方法;最后,通过实际飞行试验和数据来验证本文系统分析设计和成像方法的有效性。

1　FMCW SAR 系统设计

由于毫米波段 SAR 系统体积小、质量轻和抗干扰能力强等优势突出,非常适用于无人机等小型平台应用,而且对于短程应用毫米波在大气中的衰减就显得不特别重要[5],因此本文系统采用 Ka 波段。

为了减小天线的体积和质量实现小型化,天线采用 E 面矩形透镜喇叭天线;同时,由于采用 FMCW 体制,必须使用收发分置的双天线方法来避免连续波体制带来的收发信号泄露问题,隔离度一般能达到 60 dB。

1.1　射频单元设计

图 1 为系统射频单元组成部分,包含发射链路和接收链路。发射链路中信号输入为直接数字频率合成(DDS)产生的 750 MHz ± 150 MHz 的线性调频扫描连续波信号,幅度约为 0 dBm;来自频率综合器的本振信号为 9.2 GHz 的单频信号。在图 1 中,混频器 1 首先进行四倍谐波混频产生 36.8 GHz 的单频信号;然后与 DDS 产生的信号进行混频得到 36.05 GHz ± 150 MHz 的线性调频信号,带宽为 300 MHz。此信号经过功放产生功率为 25 dBm 的线性调频信号,然后通过定向耦合器分为两路:一部分输出至天线,到达天线的平均功率约为 23 dBm;另一部分输出至接收机,到达接收机的平均功率约为 10 dBm。在接收链路中,信号输入为天线接收的 36.05 GHz ± 150 MHz 的线性调频连续波信号,功率约为 -90 dBm ~ -30 dBm,以及来自发射链路的本振信号,功率为 10 dBm。输出至数据采集部分的功率小于 10 dBm,频率为 4 kHz ~ 10 MHz,以及来自系统控制的 5 位自动增益控制(AGC)的控制信号。接收链路采用对数放大的形式:输入信号功率在 -90 dBm ~ -60 dBm 区间段,信号增益为 60 dB;输入功率在 -60 dBm ~ -30 dBm 区间段,信号增益随着信号幅度的增加而减小,最大功率 -30 dBm 时的增益为 40 dB。

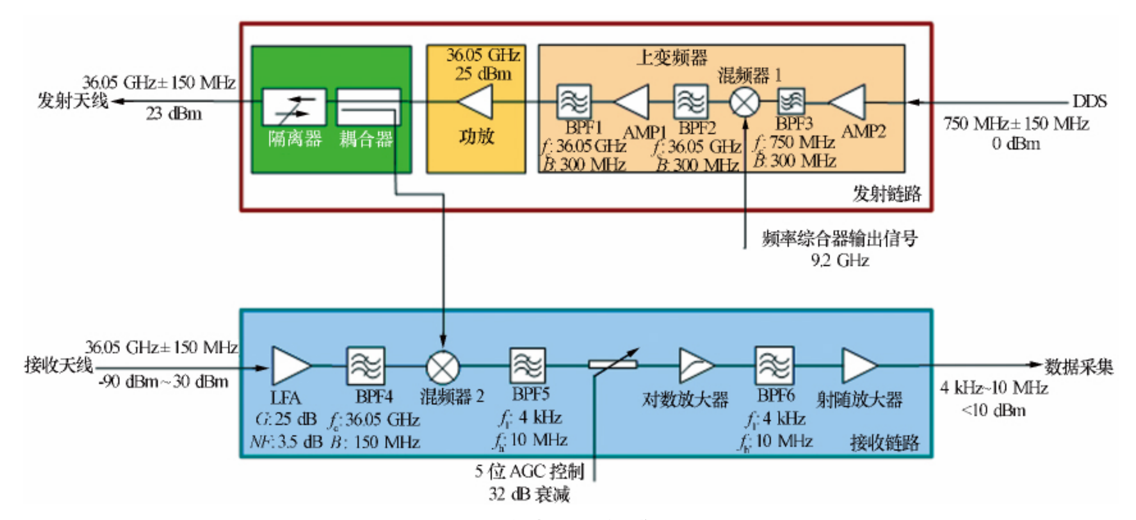


图 1　射频部分组成框图

1.2　频率综合器单元设计

频率综合器负责整个系统各种频率源的产生,并为发射模块提供发射激励信号,为接收模块提供参考本振信号,发射模块将发射激励信号进行放大,接收模块进行去调频接收。其主要完成以下功能:

1)输出给发射链路的 9.2 GHz 连续波信号,功率约为 13 dBm,发射链路对该信号进行 4 倍倍频再由 DDS 输出信号混频;

2)输出给 DDS 的本振信号,频率为 1 GHz,幅度为 3 dBm,DDS 接收该信号再生成系统所需扫频信号;

3)输出给数据采集系统的是功率为 13 dBm 的 100 MHz 中频信号,用于对接收信号进行采样;

4)输出给仪器参考用的功率为 10 dBm 的 10 MHz 的参考信号。

其结构框图如图 2 所示。

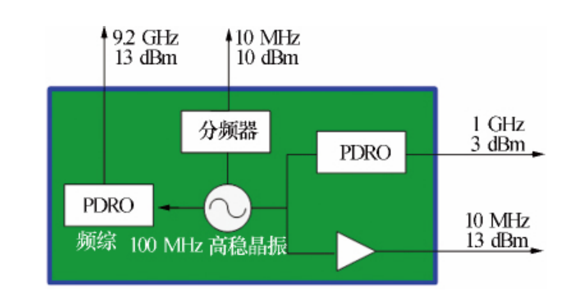


图 2　频率综合器构成框图

1.3　频率合成单元

该单元采用基于 DDS 的方案生成系统所需扫频信号,具有体积小、控制灵活和功耗小等优势,完成在系统外触发或内触发控制下产生扫频信号的功能。在本系统中,DDS 采用 1 GHz 时钟的芯片,产生带宽为 300 MHz 的扫频信号,扫描起始点频率 600 MHz,终止点频率 900 MHz。其结构框图如图 3 所示。

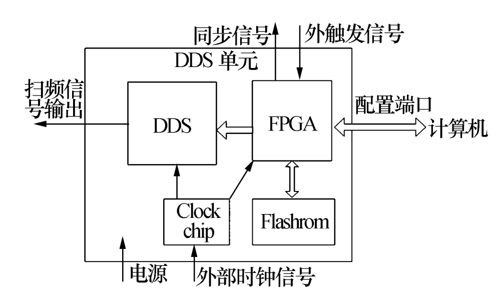


图 3　频率合成单元结构框图

1.4　数据采集存储单元设计

数据采集存储单元实现对系统中雷达连续回波信号数据采集及存储、全球定位导航(GPS)与惯导数据的接收、DDS 的触发控制、以及接收机的 AGC 调整。由于采用去调频接收方式,接收信号与发射信号进行混频之后再进入采样单元,使得采样单元的输入信号是带宽很小的中频信号,这大大降低了系统对采样单元的要求,使得采样单元能够具有体积小、质量轻、成本低和便于集成等优点,非常适合于小型 SAR 的需求。其结构框图如图 4 所示。

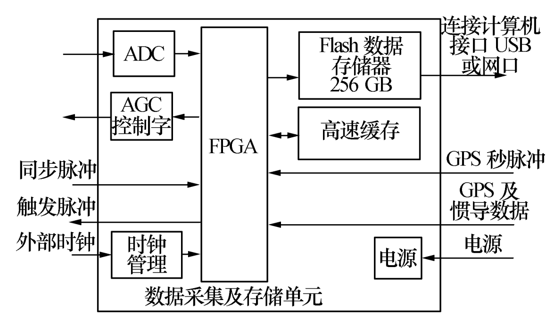


图 4　数据采集存储单元结构框图

图 5 给出了本文 FMCW SAR 射频组件与天线实物图。

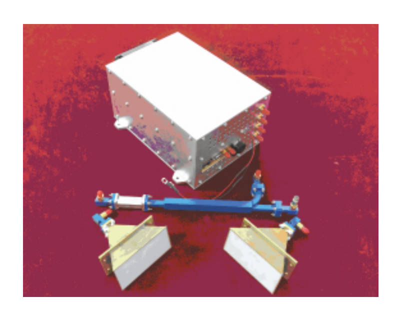


图 5　FMCW SAR 射频组件与天线

2　FMCW SAR 成像处理

2.1　去调频

FMCW SAR 一般采用去调频(Dechirp)方式接收回波信号,Dechirp 原理是将接收信号与发射信号或发射信号的延迟信号进行共轭相乘[6]。同时,FMCW SAR 系统回波延迟一般很短且远小于发射信号时宽,所以常采用发射信号作为参考信号。经过 Dechirp 后,接收信号的相位变为

$$\varphi = 2\pi\left(k\tau t + f_0\tau - \frac{k}{2}\tau^2\right) \tag{1}$$

将接收信号相位对距离时间 t 求导,可得到距离频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\frac{d\varphi}{dt} = k\tau \tag{2}$$

由式(2)可知,Dechirp 将所有目标的回波信号变为一个单频的信号,频率瞬时值与信号回波延时有关。其过程如图 6 所示。由此可见,Dechirp 使信号带宽大大降低,从而降低了对系统 A/D 采样模块的要求,从而能减轻系统质量和节约系统成本。

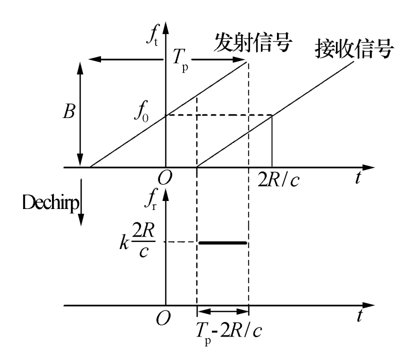


图 6　发射/接收信号时频关系与去调频原理

2.2　FMCW SAR 回波信号模型及图像重建

图 7 为 FMCW SAR 成像几何关系图,雷达工作在正侧视情形,高度为 h,速度为 v,天线波束角为 β,雷达距目标的最短斜距为 $R_0 = \sqrt{h^2 + y^2}$。

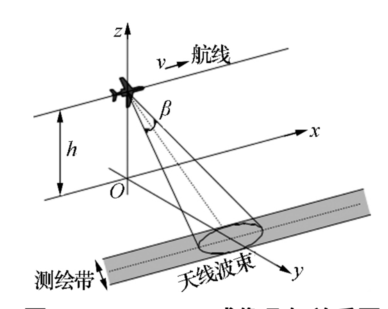


图 7　FMCW SAR 成像几何关系图

由于 FMCW SAR 发射信号时长较大,对于一个脉冲周期内的信号回波延迟是变化的,与某脉冲发射期

间内雷达至某点目标的瞬时斜距有关[7-10]，该瞬时斜距可以表示成如下

$$R(t_a, t) = \sqrt{R_0^2 + v^2(t_a + t)^2} \tag{3}$$

对式(3)在距离时间 $t=0$ 处进行泰勒级数展开，由于是在极短的脉冲持续时间 T_p 内，所以可忽略其二次及更高次项的影响，展开后瞬时斜距可表示为

$$R(t_a, t) = \sqrt{R_0^2 + v^2 t_a^2} + \frac{v^2 t_a}{\sqrt{R_0^2 + v^2 t_a^2}} t = R(t_a) + \frac{v^2 t_a}{\sqrt{R_0^2 + v^2 t_a^2}} t \tag{4}$$

式中：$R(t_a)$ 为方位时间 t_a 时刻雷达与目标的斜距。所以，在脉冲发射期间雷达与目标的瞬时斜距不仅与方位时间 t_a 有关，还与距离时间 t 有关，且可近似地认为与距离时间只成线性关系，即瞬时斜距的变化量近似不变。将式(4)对距离时间 t 求导，可得到由雷达连续运动引起的附加距离频率偏移

$$\Delta f = -\frac{2}{\lambda}\frac{\mathrm{d}R(t_a, t)}{\mathrm{d}t} = -\frac{2}{\lambda}\frac{v^2 t_m}{\sqrt{R_0^2 + v^2 t_a^2}} = f_d \tag{5}$$

式中：λ 为雷达中心频率对应的波长；f_d 为多普勒频率。由式(5)可知，附加频率偏移等于方位多普勒频率，因此称之为多普勒偏移。所以，式(4)可以表示为

$$R(t_a, t) = R(t_a) - \frac{\lambda f_d}{2} t \tag{6}$$

将式(6)代入式(1)可得到 Dechirp 之后的回波信号相位表达式，因此，接收信号的完整表达式(以复数形式表示)可以表示如下

$$s(t_a, t) = A e^{j2\pi(k\tau_a - f_d)t} e^{j2\pi f_0 \tau_a} e^{-j\pi k \tau_a^2} \tag{7}$$

式中：A 为回波信号的幅度；第一个相位项为 Dechirp 之后距离向的一次相位；第二个相位项是方位聚焦所需的相位，包含了在合成孔径时间内方位向信号的相干性；第三个相位项为剩余视频相位(RVP)，是经 Dechirp 后产生的，该项不用单独去除，可以合并入方位匹配滤波器中在方位压缩中一并去除，从而可以简化成像步骤。

为了进行距离徙动校正(RCMC)以及方位压缩，需要将该信号变换到距离多普勒域。与脉冲 SAR 不同的是，对于 FMCW SAR，直接对去斜接收信号进行方位向傅里叶变换就可以很方便地得到距离多普勒域信号形式。对于小斜视角情形，去斜接收信号在距离多普勒域具有以下形式

$$s(f_d, t) = A' e^{j\pi \frac{f_d^2}{K_a}} e^{j\frac{4\pi k}{c}R(f_d)t} e^{-j2\pi f_d t} e^{-j\frac{4\pi k}{c^2}R^2(f_d)} \tag{8}$$

式中：$A' = A_0 e^{j\frac{4\pi R_0}{\lambda}}$ 为信号幅度和常数相位；第一个相位项包含了方位向调频信号；第二个相位项为距离调制信号，该相位为距离向信号仅存的一次相位；第三个相位项为多普勒偏移项，这是相比较于脉冲 SAR 多出的相位，是由雷达相对于目标的连续运动产生，所以对于 FMCW SAR，“停走停”假设不再成立，在成像时需要校正其影响；最后一项为 RVP；K_a 为方位调频率；$R(f_d)$ 为距离多普勒域的距离形式。其中

$$\begin{cases} K_a = \dfrac{\lambda R_0}{2v^2} \\ R(f_a) = R_0 + \dfrac{\lambda^2 R_0}{8v^2} f_d^2 \end{cases} \tag{9}$$

式中：v 为雷达运行速度。由于经过去斜接收后，距离向信号变成一个单频信号。由于在时域存在一次相位变换到频域就为 sinc 型的函数，直接对接收信号进行距离傅里叶变换即可完成距离压缩，距离频域的信号位置由距离调制系数决定，将式(8)变换到距离频域即可完成距离压缩。距离频域的信号表达式为

$$s(f_d, f) = A_1 \operatorname{sinc}\left\{T_p\left[f - \frac{2k}{c}R(f_a) + f_d\right]\right\} \cdot e^{j\pi \frac{f_d^2}{K_a}} e^{-j\frac{4\pi k}{c^2}R^2(f_d)} \tag{10}$$

式(10)为 FMCW SAR 目标回波距离压缩完后的信号表达式。其中，T_p 为脉冲持续长度，由式(10)可知，FMCW SAR 在距离多普勒域的距离徙动表达式为

$$RCM = \frac{2k}{c}R(f_a) - f_d \tag{11}$$

FMCW SAR 信号时宽较大，使不同方位时刻接收的点目标回波在距离向产生了一个附加距离迁移，通过式(11)可以将其校正。

最后，用于方位压缩的匹配滤波器可以由式(10)得到，滤波器的频域形式为

$$H(f_d) = e^{j\pi \frac{f_d^2}{K_a}} e^{-j\frac{4\pi k}{c^2}R^2(f_d)} \tag{12}$$

所以，经过上述步骤，FMCW SAR 图像重建完成，最终的信号形式为

$$s(t_d, f) = A_2 \operatorname{sinc}(\pi B_a t_a) \operatorname{sinc}\left[T_p\left(f - \frac{2k}{c}R_0\right)\right] \tag{13}$$

式中：A_2 为幅度及常数相位；B_a 为方位多普勒带宽。

3　航空校飞试验

为了验证本文 FMCW SAR 系统设计与成像方法的有效性，在某轻小型飞行平台上进行了校飞试验。试验中，载机平台飞行高度约为 300 m，速度约为 55 m/s，进

行了条带式成像试验。采用本文改进的距离多普勒成像方法进行成像，图 8 显示了某区域的成像结果。图中矩形区域标注的为两条道路的岔路口，主要散射为面散射，表现在成像结果中为散射较弱的目标，椭圆形区域标注的为房屋建筑物，主要散射来自地面及墙壁构成的二次散射，所以表现在成像结果中为散射较强的目标。


a) 某区域成像结果


b) 光学图像

图 8　某区域成像结果与光学图像对比

4　结束语

本文详细地分析设计了 FMCW SAR 试验系统及其成像方法，通过对线性调频连续波和去调频体制信号处理的过程和特性分析，采用收发分置的双天线方式以提高收发隔离度，采用毫米波段频段和透镜喇叭天线以进一步减小系统的体积和重量，采用 Dechirp 方式接收信号以降低对系统 A/D 采样单元的要求，分析 FMCW 体制对接收信号和成像的影响，揭示其与“停走停”假设下的成像方法的区别，对理解 FMCW SAR 系统工作原理和模式具有重要意义，并通过实际飞行试验结果验证了本文分析设计的有效性。校飞结果表明，本文设计的 FMCW SAR 试验系统性能良好，达到此次设计和试验要求，为之后进一步的完善和提高系统性能奠定了良好的基础。

参 考 文 献

[1] DUERSCH M I. BYU micro-SAR: A very small low-power LFM-CW synthetic aperture radar [D]. Provo, Utah: Brigham Young University, 2004.

[2] 刘　闯，洪香茹，张　涛. 小型 SAR 系统设计 [J]. 火控雷达技术，2012，41(1)：1－5.
LIU Chuang, HONG Xiangru, ZHANG Tao. Design of mini-SAR system [J]. Fire Control Radar Technology, 2012, 41(1): 1－5.

[3] 高许岗，雍延梅. 无人机载微型 SAR 系统设计与实现 [J]. 雷达科学与技术，2014，12(1)：35－38.
GAO Xugang, YONG Yanmei. Design and realization of UAV high resolution miniature SAR [J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(1): 35－38.

[4] 张　军，毛二可. 线性调频连续波 SAR 成像处理研究 [J]. 现代雷达，2005，27(4)：42－45.
ZHANG Jun, MAO Erke. A study on LFMCW signal processing [J]. Modern Radar, 2005, 27(4): 42－45.

[5] 马兵强，张大炜，王岩飞. 斜视 FMCW SAR 的四阶多项式插值波数域算法 [J]. 现代雷达，2014，36(2)：47－51.
MA Bingqiang, ZHANG Dawei, Wang Yanfei. A wavenumber domain algorithm using four-order polynomial interpolation for squint FMCW-SAR [J]. Modern Radar, 2014, 36(2): 47－51.

[6] GRIFFITHS H D. Synthetic aperture processing for full-deramp radar altimeters [J]. Electronics Letters, 1988, 24(7): 371－373.

[7] WIT J J M DE, HOOGEBOOM P. Performance analysis of a high resolution airborne FM-CW synthetic aperture radar [C] //2003 International Radar Symposium. Dresden, Germany: German Institute of Navigation, 2003: 269－273.

[8] META A. Signal processing of FMCW synthetic aperture radar data [D]. Delft, Holland: Holland Delft University of Technology, 2006.

[9] LIU Y, DENG Y K, WANG R, et al. Bistatic FMCW SAR signal model and imaging approach [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 49(3): 2017－2028.

[10] NAVNEET S, ROY A, BHATTACHARYA C. High-resolution SAR image generation by subaperture processing of FMCW radar signal [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(11): 1866－1870.

蔡永俊　男，1989 年生，博士研究生。研究方向为合成孔径雷达信号处理与系统研究、全极化合成孔径雷达信息处理。

张祥坤　男，1972 年生，研究员。研究方向为合成孔径雷达信号处理与系统研究、微波遥感理论与技术。

姜景山　男，1936 年生，院士，博士生导师。研究方向为微波遥感理论与技术。